基于条纹管的压缩超快成像系统理论模拟

刘俊凯，邓 萱，杨恺知，罗秋燕，牛丽红，张敬金，刘进元，蔡厚智*，向利娟*

（深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室，物理与光电工程学院，广东 深圳・518060）

摘　要：对基于压缩感知和条纹相机的压缩超快成像系统进行了模拟仿真，原始三维图像 I（x-y-t）经数字微镜设备（digital micromirror devices, DMD）进行编码调制，然后传输至狭缝全开条纹变像管，经偏转电场作用后，多幅不同时间图像将叠加，并在 CCD 上输出最后积分图像。采用总变分还原算法将 CCD 积分图像重构出多幅原始图像 *I*（*x-y-t*）。对压缩超快成像系统的图像采集过程及还原算法进行了模拟仿真，获得了激光在空气介质中传输过程的 8 幅动态二维图像，每幅图像的曝光时间为 12.5 ps，重构信号与原始信号的相似度为 92%。

关键词：超快诊断；条纹相机；压缩感知；时间分辨率

Simulation of a compression ultrafast imaging system based on streak tube

LIU Junkai, DENG Xuan, YANG Kaizhi, LUO Qiuyan, NIU Lihong, ZHANG Jingjin, LIU Jinyuan,CAI Houzhi *, XIANG Lijuan *

（Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Minitry of Education and Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province China;)

Abstract: The original 3D image, denoted as I(x-y-t), is encoded and modulated using digital micromirror devices (DMD), subsequently transmitted to a slit full-open fringe image converter. By means of deflection via a deflecting electric field, multiple images at various time points are superimposed, resulting in the generation of the final integral image on the CCD. To reconstruct multiple original images I(x-y-t) from the CCD integral images, a total variational restoration algorithm is employed. In this study, we simulate the process of image acquisition and the restoration algorithm within the compressed ultrafast imaging system. As a result, we obtain eight dynamic 2D images depicting laser transmission through an air medium. Each image is exposed for a duration of 12.5 ps, and the reconstructed signal demonstrates a similarity of 0.92 when compared to the original signal.

Key words: ultrafast diagnosis; streak camera; compressed sensing; temporal resolution

引言

1948 年，美国电信工程师 H.奈奎斯特在信号学研究领域提出奈奎斯特采样定律。21

世纪初，华人数学家陶哲轩在图像信号复原研究中意外发现了一种现象，采样频率即使没有达到奈奎斯特采样定律的要求，也能够完美的还原重构出原始信号。由此，陶哲轩等人于 2006 年提出压缩感知（Compressive sencing)采样理论。利用信号的稀疏特性，在远小于奈奎斯特采样率的条件下，用随机采样获取信号的离散样本，最终通过重建算法重建信号。压缩感知理论自提出后，在信息、图像、生物、光学、计算机等领域获得广泛应用[1]。

超快成像是一种用于捕捉超快过程的图像成像技术，它能够实时观察和记录纳秒至飞秒级别的快速动态场景。它的发展最早起源于超快激光技术的出现，在上世纪 80 年代，高能量高功率激光的发展使得研究人员开始关注超快动态过程的实时观测。随着激光技术的广泛普及和发展，超快成像领域愈发需要快速且灵敏的成像探测器[2]。条纹变像管是超快成像领域的主流设备之一，它具有皮秒量级的高时间分辨能力，常用于惯性约束聚变（inertial confinement fusion, ICF）超快诊断。将压缩感知技术引入到条纹变像管，条纹相机将获得更多用武之地[3]。如光学领域中，观测飞秒脉冲激光实验，研究原子、分子、凝聚态物质的电子；材料学领域中，观测磁性材料自旋动力学的超快过程，探究材料的磁性行为；药学领域中，观测药物与受体吸收、分布和代谢的过程，研究药物的动力学和代谢动力学等。压缩感知与条纹相机结合的压缩超快成像系统可以在以上的超快场景中发挥重要作用。

汪立宏院士团队于 2014 年提出了一种基于压缩超快成像技术的方法，设计了高效的数据采集和重建算法，解决了超快动态过程观测中的挑战[4]。他们的方法显著突破了传统超快诊断的成像速度，同时在图像质量方面也取得了优异的表现。他们的工作进一步推动了压缩超快成像技术在超快领域的应用，为相关研究提供了有价值的参考。然而，目前的压缩超快成像技术仍面临一些挑战，例如在复杂场景或高噪声环境下的重建精度问题，以及更快的成像速度和更高的时间分辨率的要求。因此，本文针对这些问题展开研究，模拟了条纹相机的工作原理，利用还原算法重构信号，并与原始信号进行比较。结果表明，压缩超快成像系统能以极高的时间分辨率准确记录皮秒激光的运动轨迹。

1　压缩超快成像系统模型

1.1　压缩感知理论

压缩感知理论中，待测信号的采样率远低于传统信号学中的奈奎斯特采样定律。压缩感知理论精确重建原始信号存在一定条件，原始信号必须满足稀疏表达：对于 N 维的原始信号 x（$x \epsilon R_N$），在某个确定的变换域中可以用较少的非零系数 s（并且其他系数均为零或接近于零）以稀疏基Ψ（$\Psi \epsilon R_{N*N}$）来表示。x 具有稀疏性，在变换域中是 s-稀疏[5]。

$$x = \Psi s \tag{1}$$

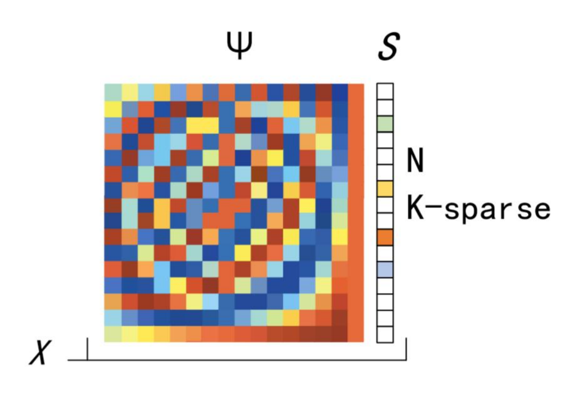


图 1 信号的稀疏表示

Fig. 1 Sparse representation of a signal

通常情况下，信号并非具有完美稀疏性。然而，只要信号近似满足稀疏性，即在某个变换域中大部份值均接近于零，且有小部分较大非零值，也可以认为该信号具有稀疏性，满足压缩感知算法采样还原基本条件。

确定稀疏域使信号满足稀疏性后，再构建与稀疏基Ψ具有非相关性的观测矩阵Φ。观测矩阵Φ的选取非常重要，其控制对目标信号的采样，使信号从高维空间投射到低维空间，并保证目标信号有效信息在采样过程中不被丢失，且采用还原算法能够将压缩采样信号准确重构出原始信号[6]。

$$y = \Phi x = \Phi \Psi s \tag{2}$$

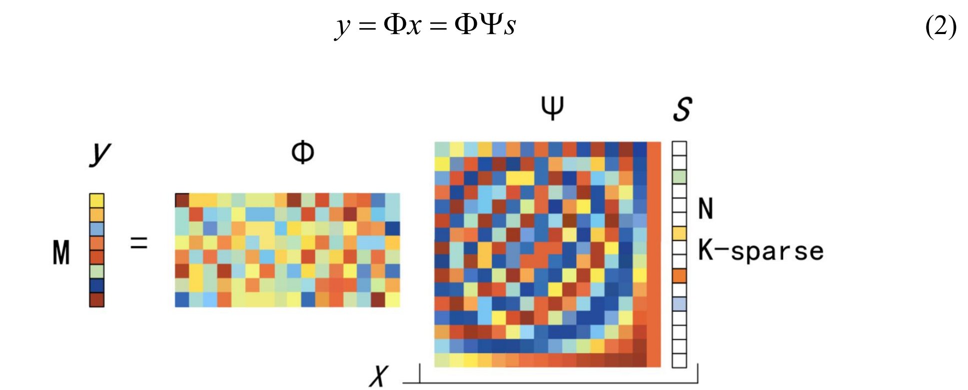


图 2 观测矩阵采样

Fig. 2 Observation matrix sampling

为了达到精准重构的效果，观测矩阵Φ需满足和稀疏基Ψ非相关性的特征，即约束等距准则(restricted isometry property, RIP)[7]，RIP 要求从观测矩阵中抽取的每 M 个列向量构成的矩阵是非奇异的，ΦΨ乘积设定为传感矩阵θ：

$$\theta = \Phi \Psi \tag{3}$$

$$y = \theta s \tag{4}$$

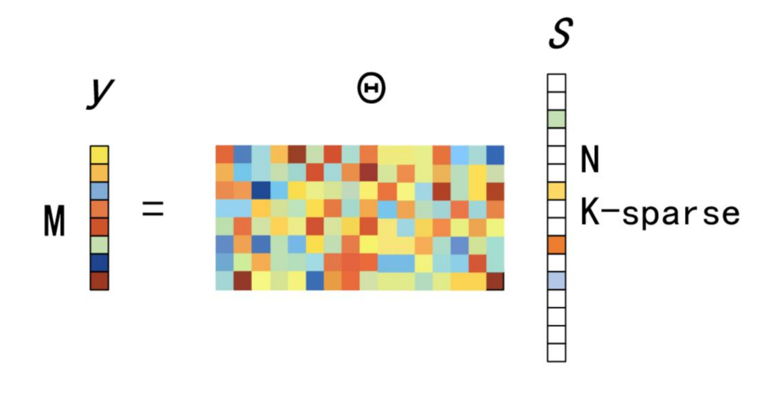


图 3 合并传感矩阵

Fig. 3 Combined sensing matrix

重构原始信号的问题转化为已知 y 和θ，求解 s 的数学模型[8]。在求解出 s 后，由式（1）便可求解出原始信号 x。观测矩阵Φ将原始信号 x 由高维空间投射到低维空间，该过程必然会丢失部分原始信号的信息，因此在求解过程中会面临方程个数远小于未知数个数的情况，直接求解此方程是一个 NP-hard 问题。陶哲轩等人证明信号满足稀疏性且观测矩阵满足有限等距性等条件时，能够比较精准的求解出 s，再通过式（1）可以求解出原始信号[9]。

1.2 压缩超快成像系统

原始图像信号 *I*（*x*-*y*-*t*）在进入条纹相机前，需要先经过 DMD 的调制。DMD 属于一种空间光调制器件，它依靠内部数量众多的微型反射镜来控制光线的反射方向[10]，从而实现“光开关”的功能。

DMD 有两个稳定的微镜状态（+12°/-12°），在压缩超快成像系统中，通过 DMD 底层的控制器来控制微型反射镜的角度，若控制器内的存储单元为“1”，则微型铝镜调整至“+12°”，对应像素的打开状态。若控制器内的存储单元为“0”，则微型铝镜调整至“-12°”，对应像素的关闭状态。将 DMD 对原始图像信号的空间编码看作 C，编码后的信号为 C*I*（*x*-*y*-*t*）[10]。

压缩超快成像系统中，采用具有皮秒时间分辨能力的条纹相机对信号进行探测成像。条纹相机工作原理示意图如图 5 所示，由变像管（包括光电转换系统、扫描偏转系统、倍增和电光转换系统）和扫描电路组成[11]。

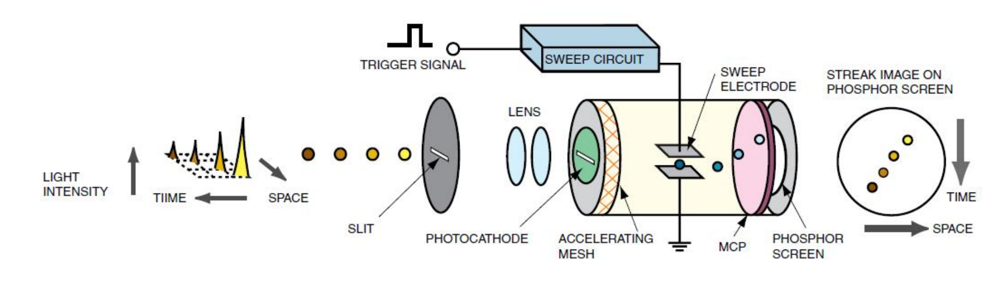


图 4 条纹相机工作原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stripe camera

利用压缩超快成像系统对超快场景信号 $I(x\text{-}y\text{-}t)$ 进行诊断，首先需要将狭缝完全打开，以取消条纹相机一维空间取样的限制。编码后的图像信号会完全进入条纹相机，不受狭缝的限制。条纹相机内部的光电阴极将输入的光信号转变为相应的电信号，这个过程信号特征参量将线性变换[12]。同时条纹相机中的扫描斜坡脉冲电信号会根据时间线性变化，对编码后的信号起到偏转的作用，将条纹相机对编码信号的偏转看作 S。偏转后的编码信号为 $SCI(x\text{-}y\text{-}t)$，将此时的信号设定为 $I'(x'\text{-}y'\text{-}t)$，则有：

$$I'(x'-y'-t)=SCI(x-y-t) \tag{5}$$

$I'(x'\text{-}y'\text{-}t)$ 于条纹相机内部以电子图像的形式存在，电子图像轰击荧光屏转变为可见光图像，该可见光图像被 CCD 图像传感器进行采集记录。在 CCD 图像传感器的单次曝光时间内 T 完成一次成像，信号传播过程中有噪声加入，将噪声对信号的影响设定为 n，则 CCD 图像传感器上最终获得测量信号为 $M(x'\text{-}y')$ [13]。这个图像采集的过程可以理解为压缩超快成像的正向数学模型。

$$M(x'-y')=TI'(x'-y'-t)+n=TSCI(x-y-t)+n \tag{6}$$

为方便模型运算，将 TSC 用 O 表示。

$$M(x'-y')=OI(x-y-t)+n \tag{7}$$

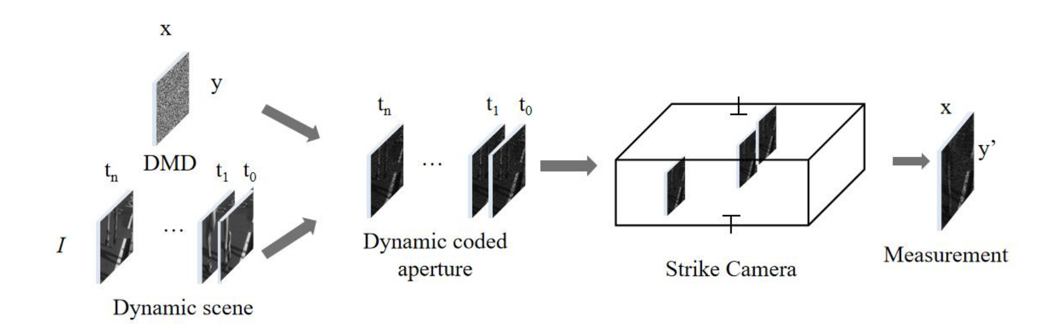


图 5 压缩超快成像图像采集过程

Fig. 5 Schematic diagram of stripe camera

为求解原始信号，从压缩超快成像系统测量信号中重构出需要观测的超快场景，既从 $M(x'\text{-}y')$ 中求解出 $I(x\text{-}y\text{-}t)$，需要反向求解方程组，这是一个欠定数学难题，无法直接求得精确解[14]。由压缩感知理论可知，可结合编码矩阵的先验知识，采用基于总变分原理的正则化方法来将这个问题转变为无约束优化运算[15]。

$$I=arg\ min\{\frac{1}{2}\|M-OI\|^2+\lambda\varphi(I)\} \tag{8}$$

其中，λ是正则化参数，φ是正则化函数。无约束优化问题转化为以下有约束优化问题[16]。

$$(I,P)=arg\ min\{\frac{1}{2}\|M-OP\|+\lambda\varphi(I)\},I=P \tag{9}$$

通过梯度下降的思路不断迭代上式中的 I 和 P，可以获得局部最优解，获得图像的原始信号 *I*（*x-y-t*）。

2　模拟实验及测量结果

2.1　压缩超快成像图像采集模拟

为了测试压缩超快成像系统对超快场景内原始三维图像信号 I（x-y-t）的诊断效果，在 Matlab 软件中模拟压缩超快成像图像采集过程，对原始三维图像信号进行编码和偏转、重叠的操作，如图 6 所示。最终由基于压缩感知的还原算法重建原始信号[17]。软件中的内置函数生成随机的 0-1 矩阵作为编码矩阵 C，编码矩阵 C 生成后保持不变，矩阵中元素 1 占比百分之五十，压缩超快成像系统的采样率为 50%。编码过程如图 7 所示，编码矩阵与图像信号数乘，以达到模拟 DMD 的编码的效果。

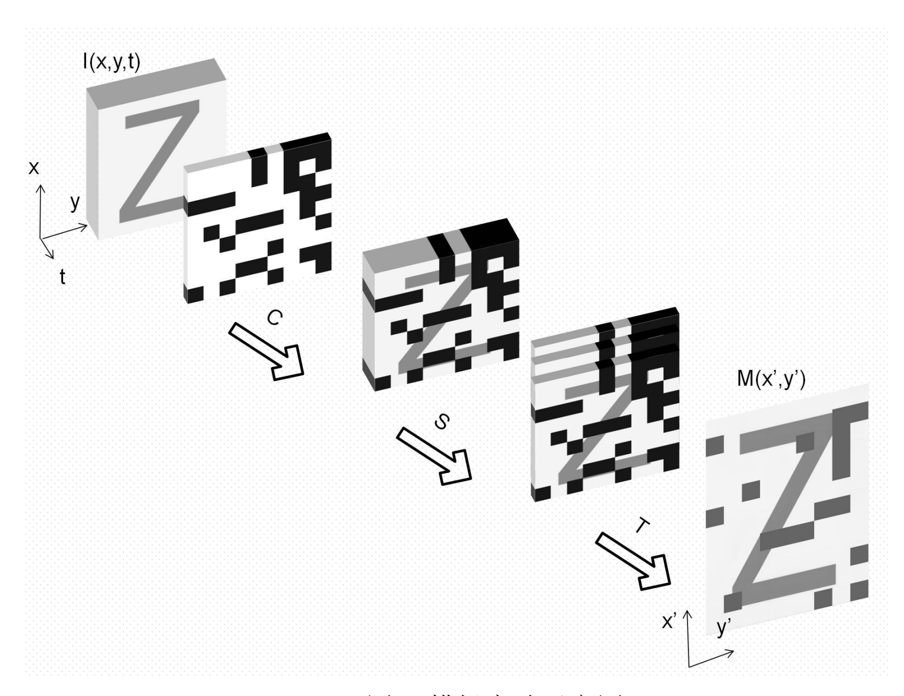


图 6 模拟实验示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation experiment

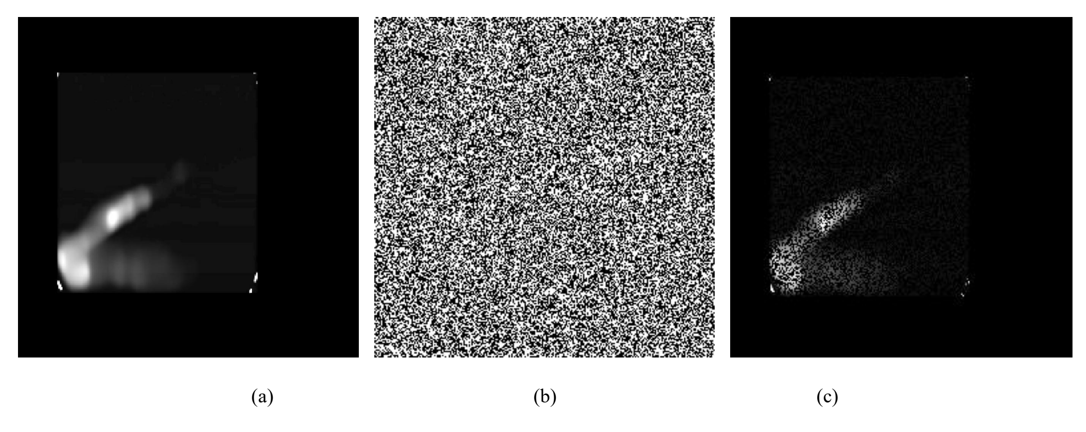


图 7 原始图像信号，模拟 DMD 矩阵，编码后图像信号

Fig. 7 (a) Original image signal; (b) Simulated DMD matrix; (c) Encoded image signal

条纹相机内偏转电场的场强呈线性均匀变化，不同时刻的图像信号，进入条纹相机后会受到不同偏转电场的偏转作用，成像于 CCD 竖直方向不同位置。

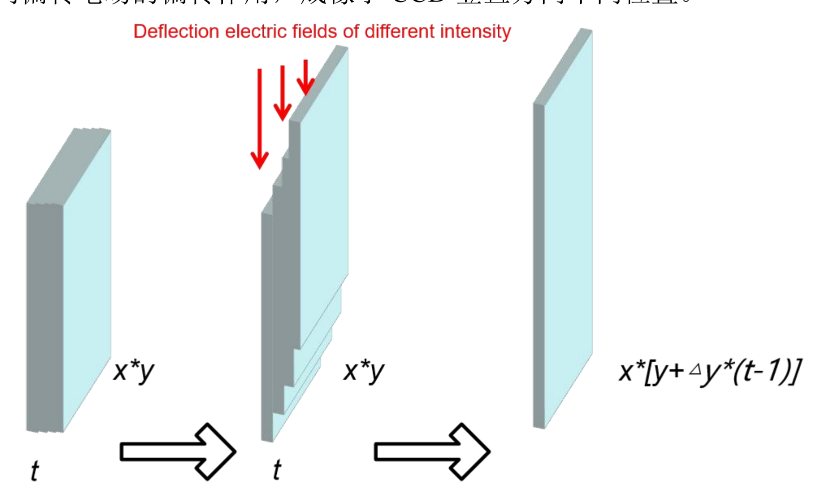


图 8 编码后信号的偏转与重叠

Fig. 8 The deflection and overlap of coded signals

模拟时采用条纹相机的参数为：极限时间分辨率为 10 ps，扫描速度为 2 mm/ns，全屏扫描时间为 20 ns，圆形荧光屏的有效直径为 40 mm。

用于模拟的超快场景是单次脉冲激光在介质中的运动及被两个平面镜反射的过程，整个运动轨迹呈 Z 型。这个超快三维图像信号时间长度为 100 ps，一共由 8 帧图像组成，每帧图像大小为 256*256 个像素，故 I(256,256,8)。其中八张原始图像信号编码后偏转重叠，得到二维测量图像信号 M（256*263）。

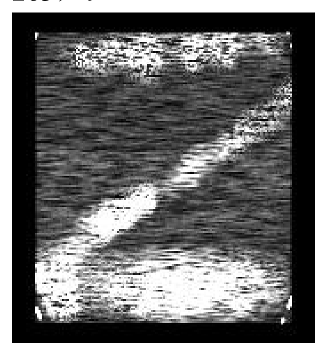


图 9 压缩超快成像测量图像信号

Fig. 9 Compressed ultrafast imaging measures image signals

2.2 压缩超快成像系统还原原始图像

要从压缩超快成像系统测量信号重构原始场景，需要结合随机编码矩阵 C 的先验知识，求解方程(8)的问题，可使用两步迭代收缩/阈值法(Two-Step Iterative Shrinkage/Thresholding, TWIST)，最小化方程中的目标函数，多次迭代来得出最优解[18]。每次迭代中，使用一组加权的阈值对信号进行软阈值处理，以产生一个更稀疏的信号。然后，对经过软阈值处理后的信号进行加权反投影操作，以生成一个反投影重构。这个反投影重构用于更新加权因子

和阈值，然后在下一次迭代中重复这个过程。TWIST 算法主要优点是能够快速收敛和具有较高的重构精度，但存在重构效率较低，迭代的重构信号最优值不一定为全局最优值等缺陷。本文采用在视频压缩和图像处理领域中广泛应用的即插即用总变分（Plug-and-Play Total Variation, PnP-TV）算法[19]。相较于传统的 TWIST 算法，PnP-TV 算法在重构图像质量，效率方面都具有优势。它结合了压缩感知和总变差（Total Variation, TV）正则化方法，用于图像恢复和去噪。将该算法运用于压缩超快成像系统中，具有简单、高效、灵活等特点。PnP-TV 方法的基本思想是将图像重建问题转化为一个优化问题，其中目标函数由两部分组成：数据项（data fidelity term）和正则化项（regularization term）。数据项度量观测数据与重建图像之间的差异，而正则化项通常用总变差来量化图像的光滑程度。

具体来说，PnP-TV 方法包含以下几个步骤：

1)数据项：使用非线性算子（例如，逆变换、传感器模拟等）将观测数据投影到图像空间中，得到投影数据。然后，将投影数据与原始图像之间的差异作为数据项。

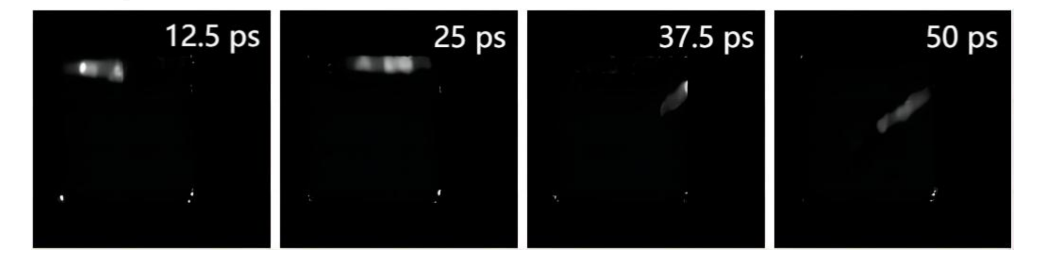
2)正则化项：采用总变差正则化项，用于对图像进行光滑约束，从而促使重建图像具有更加平滑的结构。总变差是图像中相邻像素之间差异的 L1 范数。

3)优化问题：将数据项和正则化项组合成一个优化问题，目标是最小化目标函数。在 PnP-TV 方法中，通常采用交替方向乘子法等迭代优化算法来求解这个优化问题。

4)迭代重建：通过迭代优化算法不断更新图像，直到达到收敛条件为止。每次迭代都会根据数据项和正则化项的贡献对图像进行更新。

PnP-TV 方法结合了压缩感知的优点，通过少量的观测数据来恢复图像，同时在重建过程中加入总变差正则化项，以提高图像的光滑性和去噪效果。其最大优点是允许将最先进的去噪算法应用于子优化问题的求解过程，而无需指定特定的先验，大大提高了算法的灵活性。因此，可以找到一种优秀的去噪算法并将其插入到 PnP-TV 的算法框架中，以提高算法的重建质量。比如插入广泛用于图像去噪问题的全变异去噪算法，即可实现灵活处理，相较于传统的 TWIST 算法通常很耗时，并且有许多参数需要手动调节，PnP-TV 算法在重构图像质量，效率方面都具有优势。

根据压缩超快成像测量图像信号，还原算法一共重构出八幅原始二维图像，每幅曝光时间为 12.5 ps。



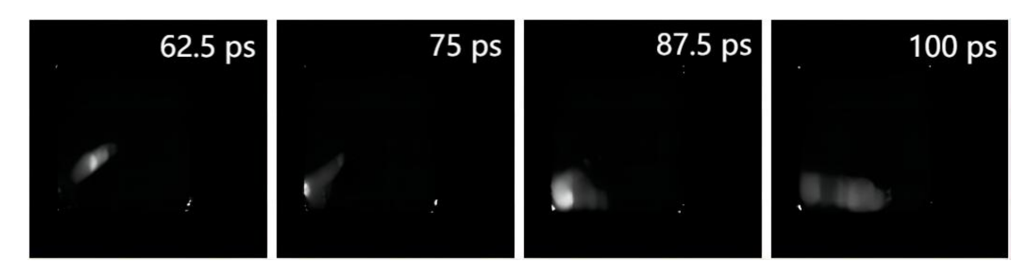


图 10 重构的原始信号

Fig. 10 Reconstructed original signal

模拟工作中可以通过计算重构图像信号与原始图像信号的峰值信噪比（Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR）和结构相似系数（Structural Similarity, SSIM）两项数据来分析图像重建效果[21]计算机重构图像信号过程一共花费 13 s，平均 PSNR 为 32 dB，SSIM 为 0.92。压缩感知是一种新兴的信号采样和重建理论，它允许以远远低于传统采样率的方式获取信号，并在后续阶段通过数学算法进行高质量的重建。在压缩超快成像系统中，压缩感知算法重建效果和稀疏表示、测量矩阵密切相关。为了实现图像重建，我们将目标函数中的稀疏先验项设置为 L1 范数：即最小化稀疏表示的 L1 范数，这促使重建图像具有稀疏性，使得大部分系数为零，但是其细节和纹理恢复能力有限。因此重建信号会存在一定的模糊和噪音。仿真结果表明，本文压缩超快成像系统可以较为精准的重构出超快场景动态图像，并实现 800 亿帧/秒的成像速度。

3 结　论

利用 Matlab 软件对压缩超快成像系统进行了模拟仿真，对原始三维图像信号进行编码、偏转、重叠等操作，获得压缩超快成像系统测量信号。采用 PnP-TV 还原算法进行原始超快图像信号重构，该算法在每次迭代时选择一个局部最优解来逐步逼近原始信号，从而提高峰值信噪比和结构相似系数。仿真结果表明，压缩超快成像系统具有皮秒量级的时间分辨能力及 800 亿帧/秒的成像速度，峰值信噪比优于 30 dB+，图像相似性系数优于 0.91。该系统可应用于超快二维动态过程诊断等领域。

参考文献

[1] Zhao X, Feng W, Liu L, et al. Optimization of compressive 4D-spatio-spectral snapshot imaging[C]//AOPC 2017: 3D Measurement Technology for Intelligent Manufacturing. BeiJing,China, SPIE,2017, 10458: 295-303.

[2] Cai H, Liu J, Peng X, et al. Note: Non-gain microchannel plate gated framing camera[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(5): 056102.

[3] Liu J, Niu L, Peng W, et al. Application of a fast electrical pulse in gated multichannel plate camera[J]. Review of scientific instruments, 2007, 78(5): 055104.

[4] Gao L, Liang J, Li C, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. Nature, 2014, 516(7529): 74-77.

[5] Yao J, Qi D, Yao Y, et al. Total variation and block-matching 3D filtering-based image reconstruction for single-shot compressed ultrafast photography[J]. Optics and Lasers in Engineering,

2020, 139:106475.
[6] Shen Q, Tian J, Pei C. A Novel Reconstruction Algorithm with High Performance for Compressed Ultrafast Imaging[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7372.
[7] Liang J, Wang P, Zhu L, et al. Single-shot stereo-polarimetric compressed ultrafast photography for light-speed observation of high-dimensional optical transients with picosecond resolution[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 5252.
[8] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on information theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
[9] Lei X, Shahid H, Wu S. A novel algorithm to improve image reconstruction quality for 2D streak camera[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, 991: 165023.
[10] Lu Y, Wong T, Chen F , et al. Compressed Ultrafast Spectral-Temporal Photography[J]. Physical review letters, 2019, 122(19):193904.
[11] 王强强. 飞秒时间分辨条纹相机的理论和实验研究[D].中国科学院研究生院: 西安光学精密机械研究所, 2014.
Wang Q. Theoretical and Experimental Research on Femtosecond Time-resolved Fringe Camera [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences: Xi 'an Institute of Optics and Fine Mechanics,2014.
[12] Liang J, Gao L, Hai P, et al. Encrypted three-dimensional dynamic imaging using snapshot time-of-flight compressed ultrafast photography[J]. Scientific reports, 2015, 5(1): 15504.期刊 1
[13] Lai Y, Xue Y, Côté C Y, et al. Single‐Shot Ultraviolet Compressed Ultrafast Photography[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(10): 2000122.
[14] Dong C, Loy C C, He K, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2015, 38(2): 295-307.期刊 1
[15] Zhao Y, Zheng S, Yuan X. Deep equilibrium models for video snapshot compressive imaging[J]. arXiv preprint arXiv, 2022，2201.06931.
[16] Zhang Y, Shen B, Wu T, et al. Ultrafast and hypersensitive phase imaging of propagating internodal current flows in myelinated axons and electromagnetic pulses in dielectrics[J]. Nature communications, 2022, 13(1): 5247.
[17] 赵付丽, 章鹤龄, 邢敬婷, 等. 基于 Matlab 的计算全息图的制作与数字再现的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 953-957.
ZHAO Fuli, ZHANG Heling, XING Jingting, et al. Realization and digital reconstruction of computer-generated hologram based on Matlab[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 953-957.
[18] Wang P, Liang J, Wang L V. Single-shot ultrafast imaging attaining 70 trillion frames per second[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 2091.
[19] Qi D, Zhang S, Yang C, et al. Single-shot compressed ultrafast photography: a review[J]. Advanced Photonics, Virtual,2020, 2(1): 014003-014003.
[20] Yuan X, Liu Y, Suo J, et al. Plug-and-play algorithms for large-scale snapshot compressive imaging[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020: 1447-1457.
[21] Yang C, Qi D, Cao F, et al. Improving the image reconstruction quality of compressed ultrafast photography via an augmented Lagrangian algorithm[J]. Journal of Optics, 2019, 21(3): 035703.

基金项目：国家自然科学基金（11775147，62001301）；广东省基础与应用基础研究基金（2019A1515011474，2019A1515110130）；深圳市科技计划项目（JCYJ20190808115605501,JCYJ20200109105201936，JCYJ20210324095007020，JCYJ20220814133504001）

作者简介：刘俊凯（1998-），男，硕士研究生。主要从事超快光电信息探测与成像研究。

E-mail:2110456025@email.szu.edu.cn

蔡厚智与向利娟为共同通信作者。

通信作者 1：蔡厚智（1983-），男，博士，研究员。主要从事超快光电信息探测与成像等相关领域的研究。E-mail：hzcai@szu.edu.cn

通信作者 2：向利娟（1989-），女，博士，副研究员。主要从事超快光电信息探测与成像、智能控制和无线充电等相关领域的研究。E-mail：xianglijuan@szu.edu.cn